

الإلكترونيات المرنة

تكنولوجيا صناعة الكترونيات المستقبل

عبدالمع محمد الهالي المختار
كلية تقنيات الحاسوب ، هندسة
الحاسوب ، طرابلس ، ليبيا
monem@cctt.edu.ly

طارق أوبكر أبوليفة
كلية التقنية الصناعية ، قسم الهندسة
الإلكترونية ، مصراتة ، ليبيا
Tarek_abulifa@yahoo.com

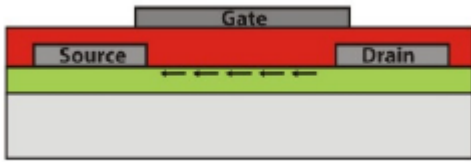
تقنيات التصنيع في حد ذاتها ملائمة ومتوافقة سواء مع الركائز المرنة أو المواد المستخدمة في التصنيع بسبب الحرارة العالية أو تأثيرها بخاصية الثني أو اللف والتي تسبب تلفا للدائرة ووظيفتها. لذلك فإن هذه التقنية تعتبر الآن مجال بحث نشط يجذب الباحثين للبحث والتطوير في جيل جديد قادم من الإلكترونيات الواعدة، إذ يقدر الآن عدد فرق البحث حول العالم أكثر من 1500 تعمل على مواضيع مختلفة في مجال الإلكترونيات المرنة، كما أن تحليل الأسواق العالمية خمن أن حجم الربح المتوقع من هذه الصناعة قد يصل إلى 30 مليار دولار هذا العام، وقد يصل إلى حوالي 300 مليار دولار بحلول العام 2028 [1].

الملخص:

تناول هذه الورقة تعريف الإلكترونيات المرنة (Flexible Electronics)، خصائصها ومزاياها من وجهة نظر مكوناتها الداخلة في صنعها، وكذلك المواد المستخدمة في بناء دوائرها ومراحل إنتاجها، إضافة إلى بعض طرق وتقنيات صنعها المختلفة. تم التركيز في هذه الورقة على الطرق المستخدمة في صناعة الإلكترونيات كبيرة المساحة (Large Area Electronics) والمعتمدة على ترانزستور الفيلم الرقيق (Thin Film Transistor TFT)، والتي يتم من خلالها تصنيع كامل الدائرة على الركائز المرنة مباشرة مع مقارنتها بالمواد المستخدمة وتقنيات التصنيع التي تستخدم مع الركائز الصلبة متى دعت الحاجة. كما تطرقت إلى بعض محددات التصنيع التي تواجه صناعة هذه الإلكترونيات في بعض التطبيقات والحلول التي استخدمت، كما تناولت بعض التحديات التي تواجهها والتي جعلت منها مجال بحث نشط يجذب الباحثين لتناولها وإيجاد حلول لها لإنتاج تطبيقات واعدة ودوائر بأداء عالي.

2. ترانزستور الفيلم الرقيق:

ارتبطت الإلكترونيات المرنة بتكنولوجيا الفيلم الرقيق (TFT)، ويعود تطور الإلكترونيات المرنة إلى الستينات حيث تم ترقيق السيلكون إلى حدود (100µm) وتجميعها على ركيزة مرنة لتوفير المرونة [2,3]، وشجع على استخدامها أزمة الطاقة في العام 1973 للتخفيض من استهلاك الكهرباء. كما تم صناعة خلايا شمسية من السيلكون غير المتبلور المهدرج (a-Si:H) على ركائز معدنية مرنة أو بوليميرية بسبب انخفاض حرارة ترسيبه. ومنذ الثمانينات تم البدء في تصنيع خلايا شمسية من السيلكون غير المتبلور المهدرج على ركائز من الصلب المرن [4] وركائز من البوليمر [5]. شكل (1) يوضح تركيبة ترانزستور الفيلم الرقيق.



شكل (1) ترانزستور الفيلم الرقيق

ظهر أول ترانزستور الفيلم الرقيق (TFT) في العام 1968، حيث صنع من مادة التيلوريوم (Tellurium) وعلى شريط ورقي، وفي السنوات اللاحقة تمكنوا من صناعته على عدد من الركائز المرنة مثل البولي إيثيلين، وكان بالإمكان ثنيه إلى نصف قطر (1/16") محتفظا بوظيفته، كما كان بالإمكان قصه على طول القناة ويضلل النصفين يعملان [6,7].

في منتصف الثمانينات بدأت صناعة شاشات الكريستال السائل النشطة المعتمدة على اللوحات الخلفية المعززة وترانزستور الفيلم السيلكوني الأحادي التبلور المهدرج الرقيق وصناعة الخلايا الشمسية على الركائز المرنة، وقد حث هذا البحث على دراسة إمكانية صنعها على ركائز جديدة، وفي العام 1994 تم تصنيع هذا الترانزستور على ركيزة بوليميد (Polymide)، بينما تمكن الباحثين من تصنيع الترانزستور على شريحة مرنة من الصلب المقاوم للصدأ (Stainless Steel)، وتصنيع

1. مقدمة:

جذبت الإلكترونيات المرنة مؤخرا الكثير من الاهتمام نظرا لتطبيقاتها الواعدة المتمثلة في إمكانية الحصول على حلول رخيصة لتطبيقات الإلكترونيات كبيرة المساحة (Large Area Electronics) مثل الشاشات والتلفزيونات القابلة لللف، الورق الإلكتروني، الجلد الإلكتروني، الخلايا الشمسية، الحساسات الذكية ودوائر تحديد الهوية باستخدام موجات الراديو وغيرها. ورغم حداثة هذه التطبيقات إلا أن الإلكترونيات المرنة بدأت منذ عدة عقود، فقبل أكثر من أربعين عاما تم ترقيق الخلايا الشمسية المصنوعة من السيلكون أحادي التبلور لتخفيف وزنها وزيادة قدرتها لتستخدم في الأقمار الصناعية، ولأنها رقيقة فقد كانت لينة ومرنة ويمكن ثنيها. والمرونة تعني الكثير من المزايا هنا، فهي تعني قابلية للانحناء، خفة في الوزن، سهولة التشكيل، مقاومة للكسر، إنتاج على مساحة كبيرة، وغيرها.

وتعتبر الإلكترونيات المرنة توجها جديدا في عالم صناعة الإلكترونيات للتعامل مع مشاكل الأعباء المتزايدة على الرقاقات المتكاملة. وهي ببساطة تجميع الدوائر الإلكترونية على شريحة أو ركيزة مرنة (شرائح زجاج أو بلاستيك أو معدن) للاستفادة من خصائص الركيزة المرنة والمتمثلة في خفة وزنها، مرونتها، شفافيته، متانتها، خصائصها العازلة، كثافة مكونات دوائرها، إضافة إلى انخفاض تكلفة التصنيع، استقرارية أبعادها، انخفاض معاملات التوسع الحراري وغيرها من الخصائص المختلفة، متيحة بذلك إمكانية الحصول على أجهزة خفيفة الوزن ورقيقة وقابلة للطي واللف وغيرها من المزايا التي فتحت أبوابا لتطبيقات واعدة كانت بالأمر بعيدة المنال مع تقنية التصنيع المعتمدة على السيلكون.

لم يكن من السهل جعل الإلكترونيات المرنة واقعا ملموسا نرى منتجاته وتطبيقاته الواعدة اليوم، فالأمر لم يكن مجرد استبدال لركيزة صلبة بركيزة مرنة، إنما تتطلب الأمر استحداث مواد جديدة في تصنيع المكونات والدوائر على هذه الركائز سواء العضوية منها أو غير العضوية، وكذلك لم تكن

$$\varepsilon=d/2r \dots\dots\dots (1)$$

إذا كانت الشريحة ليست متجانسة كما هو الحال في طبقة من ترانزستور الفيلم السيلكوني المهدرج المبني على شريحة من البلاستيك، فإن الانفعال سيختلف عن الانفعال المشار إليه بالمعادلة السابقة وان كان لا يزال مفيداً كقيمة تقريبية. وعلى كل ففي تطبيقات الشاشات وترانزستورات لوحات التعزيز يجب أن تكون قيمة الانفعال أقل من القيمة الحرجة. ولتصغير قيمة الانفعال حتى مع ثني حاد (تصغير قيمة r) يتم تقليل قيمة السمك للشريحة (d).

تشكل الأسطح الإلكترونية بواسطة تقنية إعادة تشكل البلاستيك، ويمكن أن يمتد التشكيل ليصل إلى حد الكسر للفيلم الغير عضوي او المعدني الرقيق، ولذلك تتم حماية المكونة من خلال وضعها على جزر صلبة. وعلى كل يتم هنا استخدام المواد التي يمكنها الخضوع لعملية تشكيل البلاستيك لضمان عدم عطب المكونات الغير محمية [12،11،13].

4. الركائز المستخدمة في تصنيع الاكترونيات المرنة (Substrates):

فتح استخدام الركائز المرنة الباب أمام الكثير من التطبيقات الواعدة في شتى المجالات، إلا أن هذه الركائز يجب تتوفر فيها المتطلبات التالية:

1. الخصائص البصرية، حيث يجب أن تكون واضحة بصريا وتتمتع بمعامل انكسار منخفض.
2. خشونة السطح، حيث يجب تجنب خشونة سطحها لتأثيرها على الوظيفة الكهربائية للدائرة وعلى درجة رقة الفيلم الشبه الموصل.
3. الخصائص الحرارية والحرارية الميكانيكية، حيث أن اختلاف درجة الحرارة التي تتحملها الركيزة عن درجة حرارة عملية المعالجة يمكن أن يؤدي إلى كسر الفيلم خلال عملية المعالجة، لذا من الضروري أن تكون درجة الحرارة التي تتحملها الركيزة أقل من درجة حرارة المعالجة للفيلم. أيضا استقرار أبعاد الركيزة البلاستيكية خلال عملية المعالجة أمر ينبغي أن يأخذ في الحسبان.
4. الخواص الكيميائية، حيث يجب أن لا تكون الركيزة مصدرا للملوثات والشوائب إضافة إلى أنها يجب أن تكون خاملة كيميائيا ولا تتفاعل مع المواد الكيميائية المستخدمة في التصنيع. إضافة إلى أن مقاومة النفاذ الغازات والماء عبر الركائز هو أيضا أحد المتطلبات المهمة للركائز المرنة.
5. الخواص الميكانيكية، معامل المرونة يجعل من الركيزة قاسية، وسطح الركائز القاسي يشكل دعما لطبقة المكون.
6. الخصائص الكهربائية والمغناطيسية، العزل الكهربائي للركيزة مطلوب، وكونها عازلة يقلل من ظاهرة اقتران السعات وهذا أمر مطلوب. أما الركائز الممغنطة فيمكن ان تستخدم مؤقتا لتثبيت الركائز خلال المعالجة او لتثبيت المنتج النهائي.

يوجد ثلاثة أنواع من مواد الركائز التي تستخدم للاكترونيات المرنة وهي الركائز الزجاجية والبلاستيكية والصلب المقاوم للصدأ. شكل (2) يوضح شكل هذه الركائز، بينما يوضح الجدول (1) خصائص كل منها. [14]

ترانزستور الفيلم الرقيق من السيلكون متعدد التبلور على شريحة من البلاستيك باستخدام الصقل بالليزر [9،8].

ومذ ذاك الحين توسعت البحوث بسرعة كبيرة وتوالت عروض منتجات الشركات المختلفة، حيث عرضت شركة سامسونج في 2005 لوحة العرض الكريستالي المرنة بنصف قطر 7 بوصة، في حين ظهر نموذج لشاشة معتمدة على الثنائي العضوي الباعث للضوء بكل الالوان بلوحة معززة من ترانزستور فيلم السيلكون متعدد التبلور الرقيق على شريحة من الصلب [10].

3. المواد المستخدمة في الاكترونيات المرنة:

تتكون التركيبة العامة للاكترونيات المرنة من الركيزة (Substrate)، والكترونيات لوحات التعزيز، إضافة إلى التغليف. ولكي تكون الاكترونيات مرنة يجب أن تتمتع هذه التركيبات الثلاثة بالمرونة، وكذلك أن تكون قابلة للثني واللف لدرجة معينة دون أن تفقد وظيفتها. إذ أن فقدانها للمرونة سيؤدي إلى تشقق الفيلم أو كسر الركيزة وعطب المكونات الإلكترونية المكونة للدوائر.

يوجد طريقتين لصناعة الدوائر الإلكترونية المرنة، الطريقة الأولى تتمثل في تصنيع الدائرة كاملة على شريحة صلبة، وتسمى الركيزة الحاملة، لتنتقل فيما بعد وتثبت على الركيزة المرنة. أما الطريقة الثانية فتتمثل في تصنيع كامل الدائرة على الركيزة المرنة مباشرة.

في الطريقة الأولى يتم بناء الدائرة كاملة بطرق التصنيع التقليدية المستخدمة مع السيلكون على شريحة من السيلكون أو الزجاج لتنتقل فيما بعد إلى شريحة مرنة، وقد تم تطوير هذه الطريقة لتشمل تثبيت أشربة من مكونات السيلكون والجاليوم ارسنايد على مطاط صناعي ممتد لتشكيل شبه موصل موجي يستطيع أن يمتد ويرتخي عكسياً. وتتميز هذه الطريقة بانها تتيح بناء دوائر تتميز بأداء عالي لا يمكن الحصول عليه بالبناء المباشر على ركائز البلاستيك بسبب الحرارة المرتفعة المطلوبة لعملية المعالجة على سبيل المثال، بينما يعيب هذه الطريقة كلفتها العالية ومحدودة المساحة.

تصنع الدوائر الإلكترونية في جل التطبيقات على سطوح الركائز البلاستيكية، إلا أن هذا ليس ممكنا في كل الحالات ولعدة أسباب من بينها أن بعض عمليات المعالجة التقليدية والمستخدمه مع ركائز السيلكون لا تتوافق مع الركائز البلاستيكية كعمليات المعالجة التي تتطلب حرارة عالية جدا مثلا. ولذلك فإن البناء المباشر على الركائز البلاستيكية ممكن عند استخدام مواد شبه موصلة كالسيلكون عديم أو متعدد التبلور والذي يمكن معالجته عند درجة حرارة منخفضة، أو عند تطوير طرق معالجة جديدة، أو باستخدام مواد شبه موصلة جديدة تتناسب ومرونة الركيزة، ويمكن بنائها مباشرة على أن يتم التنازل عن جودة الاداء مقابل استخدام تقنيات تتطلب حرارة منخفضة وتستطيع أن تتحملها المادة البوليميرية. ومن هنا يمكن الإشارة إلى أن الطريقة الثانية هي مجال بحث حيوي اليوم للباحث، وستتناول الورقة الطريقة الثانية وهي البناء المباشر على الركائز المرنة.

1.3 درجة المرونة:

تعني المرونة عدة خصائص بالنسبة للمصنعين والمستخدمين، ومن وجهة النظر الميكانيكية فإنها تصنف إلى ثلاثة فئات، القابلية للثني واللف، التشكل بشكل دائم والمرونة المطاطية. كل الأدوات والمعدات المستخدمة في عمليات التصنيع صممت لتعمل على ركائز مسطحة ولذا فإن الركائز تشكل وتنتي لاحقا بعد انتهاء العملية قدر الامكان. عند ثني أو طوي شريحة متجانسة ميكانيكيا ذات سمك (d) إلى شكل اسطواني بنصف قطر (r) عموديا على محور الثني فإن سطحها الخارجي سوف يتمدد بينما سطحها الداخلي سوف ينكمش أو ينضغط بسبب انفعال الثني (ε) المعطى بالمعادلة (1) التالية:

عبرها. الفيلم البوليمري يتمدد وتتكشف بالحرارة والتبريد، ويمكن التقليل من اثر ذلك عبر الصقل الأولي المطول.

تتضمن قائمة البوليميرات المناسبة للإلكترونيات المرنة عدد من البوليميرات مثل اللدائن الحرارية شبه البلورية مثل (Polyethylene terephthalate PET) وكذلك اللدائن الحرارية غير البلورية مثل (Polycarbonate PC) و (Polyethersulphone PES) و المواد التي تتحمل درجة حرارة مرتفعة قبل التحول الزجاجي (Tg) مثل (Polyarylates) و (Polymide PI) و (Polycyclic olefin PCO) و (PAR PC, PES, PAR) حيث تتمتع المواد (and PCO) مثلًا بوضوح بصري ودرجة حرارة انتقال زجاجي عالي مقارنة ب مواد (PET, PEN and PI) بينما معدل تمددها الحراري عالي ومقاومتها للتفاعل الكيميائي منخفضة. ولا يوجد بوليميرات تستطيع أن توفر الشرط اللازم للنفذية المنخفضة في تطبيقات الثنائيات العضوية المشعة للضوء (OLED)، حيث تكون النفذية لهذه المواد في حدود 1 إلى 10 جرام لكل متر مربع يومياً مقارنة بحد أدنى مطلوب بقيمة 10^{-6} جرام لكل متر مربع يومياً بالنسبة للماء، ومن 1 إلى 10 سم³ لكل متر مربع يومياً للأكسجين مقارنة بالحد الأدنى بقيمة 10^{-5} سم³ لكل متر مربع يومياً بالنسبة للأكسجين. ويمكن معالجة هذه العيوب وتقليل النفذية والامتصاص للماء والغازات وكذلك تحسين مقاومتها للتفاعلات الكيميائية والتصاق الفيلم وتقليل خشونة السطح عبر طلائها بطبقة حاجزة [15].

3.4 الشرائح المعدنية (Metal Foil Substrates):

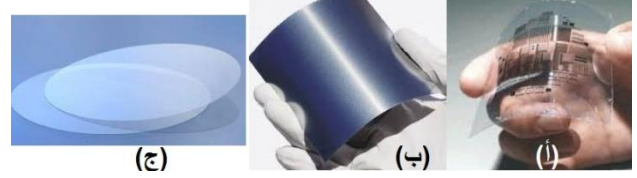
صناعة الشرائح المعدنية بسبك أقل من $125\mu\text{m}$ يجعلها مرنة ومناسبة لتطبيقات الشاشات الباعثة والعاكسة والتي لا تتطلب خاصية الشفافية. الصلب المقاوم للصدأ أستخدم بشكل واسع من قبل الباحث بسبب مقاومته للتآكل والتفاعل الكيميائي. كما أن ركائز الصلب المقاوم للصدأ تتحمل درجات حرارة معالجة تصل إلى 1000 درجة مئوية محتفظة باستقرارية أبعادها، إضافة إلى أنها مقاومة لامتصاص الماء ونفاذ الأكسجين، وقابليتها للمغنطة يمنحها امكانية تثبيتها ومناولتها مغناطيسياً أثناء عملية المعالجة، كما أنها متينة مقارنة بغيرها من الركائز.

يعيب هذا النوع من الركائز هو وجود علامات على سطحها أثناء صناعتها ناجمة عن عملية الدرفلة أثناء التصنيع، وهذا يجعلها خشنة وقد يؤدي ذلك إلى عدم نجاح المكون، حيث تبلغ قيمة الخشونة لسطحها حوالي 100nm في حين لا تتجاوز خشونة سطح ركائز الزجاج 1nm . ولذا يتم صقل هذه الاسطح بشكل جيد أو أن تستقطب بواسطة فيلم من مادة عضوية أو غير عضوية أو مزيج منهما [14،16،17].

خاصية التوصيل الكهربائي للركائز المعدنية قد تكون مطلوبة كما هو الحال في الخلايا الشمسية حيث تعمل كموصل خلفي، لكنها غير مرغوبة في بقية التطبيقات، ولذا تظلي الركيزة بطبقة عازلة كهربياً، وهذا العزل يفيد أيضاً في زيادة مقاومتها للتفاعل الكيميائي.

5. التغليف (Encapsulation):

تغليف الفيلم الرقيق أستخدم منذ عقود، حيث استخدم الطلاء بحاجز معدني من طبقة واحدة، تلاه الطلاء بحاجز شفاف من طبقة واحدة أيضاً. والأن يستخدم الطلاء بتركيبة متعددة الطبقات من الأكسيد أو النيتريد والبوليمر. الشكل (3) يوضح تغليف ثنائي عضوي مشع للضوء (OLED) بطبقة من أكسيد الألمونيوم وأكسيد الزنك للحماية.



شكل (2): (أ) ركيزة بلاستيكية، (ب) ركيزة صلب مقاوم للصدأ، (ج) ركيزة زجاج

جدول (1): خصائص الركائز المستخدمة في صناعة الإلكترونيات المرنة

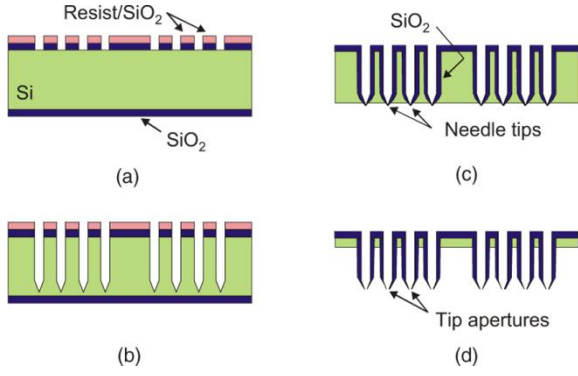
الخاصية	الوحدات	زجاج	بلاستيك	صلب مقاوم للصدأ
السبك	μm	100	100	100
الوزن	g/m^2	250	120	800
نصف القطر الامن للثنائي	cm	40	4	4
القابلية لتقنية لفة الى لفة	-	غير محتمل	محتمل	نعم
الشفافية المرئية	-	نعم	البعض	لا
درجة الحرارة القصوى للمعالجة	$^{\circ}\text{C}$	600	180، 300	1000
معامل تمدد حراري	$\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$	4	16	10
معامل المرونة	GPa	70	5	200
نفذية الاوكسجين وبخار الماء	-	لا	نعم	لا
معامل التوسع المائي	$\text{ppm}/\%RH$	لا يوجد	11،11	لا يوجد
التسخين الاولي	-	ربما	نعم	لا
الحاجة للاستقطاب	-	لا	لا	نعم
الحاجة الى طبقة عازلة ولماذا؟	-	ربما	نعم: الالتصاق والتخميل الكيميائي	نعم: العزل الكهربائي والتخميل الكيميائي
التوصيل الكهربائي	-	لا يوجد	لا يوجد	عالي
التوصيل الحراري	$\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	1	0.1 - 0.2	16
تغليف البلاستيك	سمك الركيزة	5x	1x	8x
التشكيل بعد معالجة المكون	-	لا	نعم	لا

1.4 ركائز الزجاج الرقيق (Glass Foil Substrates):

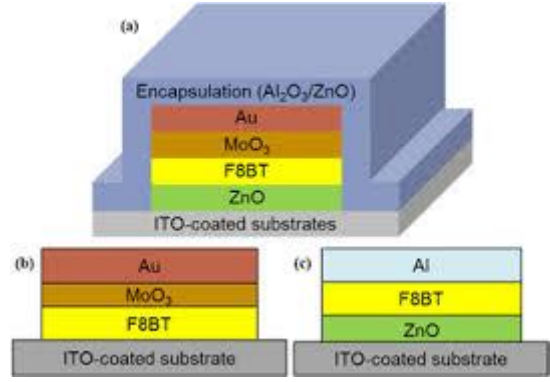
الالواح الزجاجية هي الركيزة القياسية للوحات العرض المسطح اليوم. ان صناعة الالواح الزجاجية بسبك بضعة مئات من الميكرن يجعلها مرنة [42،43]، وتتمتع بكل خصائص الزجاج مثل النفذية البصرية، معامل انكسار منخفض، نعومة السطح سماحية درجة حرارة تصل إلى 600°C ، استقرار أبعاد عالي، معامل تمدد حراري منخفض، مقاومة لمعظم المعالجات الكيميائية، لاتسمح بنفاذ الغازات أو الماء، مقاومة للخدش وعازلة كهربياً. ورغم كل هذه الخصائص الا انها هشّة وصعبة المناولة، ويمكن تقليل احتمال كسرها خلال المناولة عبر تصفيحها برفائق بلاستيكية او طلائها بطلاء رقيق وصلب او بطلائها بمادة بوليميرية سميكة.

2.4 ركائز البلاستيك (Plastic substrates):

تعتبر ركائز البوليمر عالية المرونة وغير مكلفة ومتوافقة مع المعالجة بتقنية لفة الى لفة. ولكنها بالمقابل غير مستقرة حرارياً وغير مستقرة الابعاد مقارنة بالركائز الزجاجية، كما انها تسمح للغازات والماء بالنفاذ



شكل (4) خطوات المعالجة على دفعات لإنتاج مصفوفة من إبر ثاني أكسيد السيلكون الميكروية



الشكل (3) تغليف ثنائي عضوي مشع للضوء (OLED) بطبقة من أكسيد الألومنيوم وأكسيد الزنك

تعرف مرونة الشريحة من خلال صرامة انحنائها (D) المعطاة بالمعادلة (2) التالية:

$$D=Et^3/12(1-\nu) \dots\dots\dots (2)$$

حيث E هي معامل يونغ، و t هي سمك الشريحة أما ν فهي معامل بويسن للشريحة [21].

تثبيت الركائز والصاقها مؤقتا الى حاملة صلبة خلال عملية المعالجة يمكن أن يحسن من استقرار أبعادها، والاصاق هنا ينصح به عند ترسيب مادة غير عضوية على شريحة بوليمر نتيجة للانفعال الكبير الذي قد يحدث بسبب هذا المزيج. المادة اللاصقة يجب أن توفر قوة قص مناسبة بين الركيزة والحاملة وأن تكون خاملة وتطلق القليل من الغاز والشوائب. وفي نهاية العملية يجب أن تزال دون أن تسبب عطا للمكونة الالكترونية. لواصل اللدائن الحرارية توفر مقاومة للمذيبات ويمكن ازلتها بالتسخين، إلا أنها مع ذلك تفرض سقفا لدرجة حرارة العملية وهذا يحد من استخدامها في المعالجات التي تتطلب حرارة عالية.

2.6 صناعة الالكترونيات المرنة بتقنية لفة إلى لفة (Roll to Roll):

ارتبطت هذه التقنية بصناعة الالكترونيات المرنة كبيرة المساحة، فتصنيع الالكترونيات الكبيرة المساحة بما فيها الخلايا الشمسية أمر مطلوب لتقليل التكلفة، حيث تصنع الخلايا الشمسية من السيلكون عديم النبلور بواسطة هذه التقنية على الصلب المرن وشرائح البوليمر (PI). إن صناعة الخلايا الشمسية والشاشات وغيرها من الأجهزة الكترونية يتطلب عددا الخطوات يتخللها العديد من عمليات الطباعة بالإضافة المباشرة، القناع، الحفر الضوئي وغيرها، وكل هذه التقنيات متوافقة مع طريقة المعالجة لفة إلى لفة. ما يعيب هذه الطريقة أن الكترونيات دوائر التعزيز تتطلب دقة وانتاجية عالية في حين أن الطباعة الضوئية وادوات الحفر المتوفرة حاليا لا توفر الدقة المطلوبة [24,23,22].

هناك العديد من الأدوات المستخدمة في تقنية المعالجة لفة إلى لفة اليوم مثل الحفر بالبلازما، البصق، الحفر بالشريط، المبخر، الكاتب الليزري والطباعة الحجرية وغيرها، وهي طرق متعددة تعطي تنوعا في طرق المعالجة تتناسب وطبيعة المواد المستخدمة. شكل (5) يوضح صناعة ثنائي عضوي مشع (OLED) باستخدام تقنية لفة إلى لفة.

يستخدم الآن رقائق بلاستيكية معدنة على نطاق واسع لتغليف المكونات الالكترونية كالمستخدم في تغليف الاطعمة واللوازم الطبية أيضا، حيث يمكن لفيلم من الألومنيوم بسمك من 10nm إلى 100nm أن يقلل من نفاذ الغازات بنسبة 1:1000 مقارنة برقائق البوليمر غير المغلفة. أما في حالة الحاجة إلى شفافية المكون فيستخدم حاجز أكسيدي شفاف يطلى بالبصق أو التبخير الكيميائي. وحاليا تطلق الركائز البوليميرية بطبقة رقيقة من الاكاسيد الهشة والتي تكون مرنة عندما تكون رقيقة لضمان المرونة [18,19].

رغم فعالية المواد العازلة غير العضوية من طبقة واحدة مثل ثاني أكسيد السيلكون وأكسيد الألومنيوم ومقاومتها لنفاذ الغازات والماء إلا أن صناعتها لا تخلو من العيوب المجهرية والشقوق والحبيبات والتي تسبب مسارات تتسرب منها الغازات والأبخرة. وللتغلب على ذلك يتم استخدام أكثر من طبقة طلاء من المواد غير العضوية ثم طبقة واحدة بوليميرية سمكية لزيادة مرونة الهيكل المركب للحاجز أو الغلاف [20,18].

وتشكل صناعة الحاجز الفيلمي الرقيق تحديا كبيرا لجعل شاشات (OLED) مرنة. فركائز البوليمر تتطلب تغليفا لضمان خمولها وعدم تفاعلها وتحتاج أيضا إلى تغليف سطحها الخارجي لمنع نفاذ الغازات والأبخرة لإطالة عمرها، في حين أن هذه الشاشات تشتت الشفافية حتى تتمكن من تمرير الضوء الذي تولده لتعمل، وهذا يمثل تحديا لهذه التقنية.

6. تقنيات صناعة الالكترونيات المرنة:

1.6 صناعة الإلكترونيات المرنة بتقنية المعالجة على دفعات (Batch Processing):

تصنع لوحات العرض والدوائر الالكترونية بطريقة تسمى المعالجة على دفعات، ويوضح الشكل (4) خطوات المعالجة على دفعات لإنتاج مصفوفة من إبر ثاني أكسيد السيلكون الميكروية. في هذه الطريقة تقطع الركائز المرنة إلى رقائق صغيرة توضع على ركائز زجاجية أو سيلكونية. يتم التعامل مع هذه الشرائح بعدة طرق خلال عمليات المعالجة، ومنها:

- وضعها على شريحة صلبة حاملة، طبقة وسطها لأعلى.
- وضعها على شريحة صلبة حاملة، تلصق للحاملة وسطها لأعلى أو لأسفل.
- وضعها في إطار توتير وسطها لأعلى أو لأسفل.
- وضعها في إطار، طبقة وسطها لأسفل.
- لصقها إلكتروستاتيكية إلى ركيزة صلبة.
- ربطها مغناطيسيا إلى ركيزة صلبة.

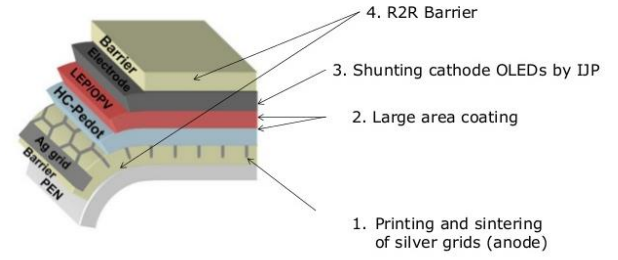
حرارة عالية لضمان الحصول على كفاءة أداء عالية للمكونات المصنعة. مشكلة التغليف للمكونات لغرض الحماية أو الحصول على خصائص منع النفاذ للغازات تشكل عائقاً أمام خاصية الشفافية التي يجب أن تتمتع بها بعض التطبيقات كما هو الحال في شاشات OLEDs، إلى غير ذلك من التحديات. حالياً يوجد عشرات الآلاف من الباحثين حول العالم الذين يعملون في مجال تطوير هذه الصناعة للتغلب على هذه التحديات سواء على صعيد المواد الداخلة في تكوينها أو تقنيات التصنيع المستخدمة في إنتاجها، بهدف تحسين أداء منتجاتها والوصول إلى المزيد من التطبيقات الواعدة في شتى المجالات.

8. الخلاصة:

الإلكترونيات المرنة مجال بحث خصب وجذاب للباحثين لما يفتحه من آفاق أمام العديد من التطبيقات الواعدة والمهمة في شتى المجالات والتي من غير الممكن الحصول عليها من الإلكترونيات التقليدية وحتى مما هو متاح حالياً من إمكانيات وتقنيات للإلكترونيات المرنة. في هذا البحث تم عرض مفهوم الإلكترونيات المرنة ومكوناتها وطرق صناعتها وخصائص المواد المستخدمة في بنائها، وكذلك بعض التقنيات المستخدمة في صناعة ومعالجة هذه الإلكترونيات. وقد تم عرض بعض الأمثلة لكل منها واستعراض مزاياها وعيوبها، إضافة إلى محددات استخدامها في بعض التطبيقات والتقنيات، مع استعراض بعض الحلول المستخدمة للتغلب على عوائق استخدام بعض هذه المواد أو التقنيات في بناء الدوائر المرنة. ومن خلال ماتم استعراضه يمكن القول بأن هذه الصناعة هي صناعة واعدة رغم مرور عقود على بدايتها، وتشمل أنشطة البحث والتطوير كافة مكونات الإلكترونيات المرنة، سواء على صعيد المواد العضوية وغير العضوية المستخدمة، أو مجال التقنيات المستخدمة في تصنيعها وذلك لغرض التقليل من محددات استخدام بعض هذه المواد في بعض التطبيقات لضمان جودة المنتجات وكفاءة الأداء، وهذه إحدى التحديات الكبيرة. ولازال مجال البحث والتطوير خصباً فيها ومتسارعاً وبشكل متزايد يعكس الطلب المتزايد على ماتعد به من تطبيقات، وكذلك على ماتعد من به تقنيات ومواد جديدة تحسن أداء ما هو متاح حالياً من تطبيقات تستخدم في يومنا هذا.

المراجع:

- [1]- Jupiter Hu, "Overview of flexible electronics", ITRI's Viewpoint, 28th IEEE VLSI Test Symposium, 2010.
- [2]- Crabb RL, Treble FC, "Thin silicon solar cells for large flexible arrays". Nature 1223–1224, 1967.
- [3]- Ray KA, "Flexible solar cell arrays for increased space power", IEEE Trans Aerosp Electron Syst v AES-3, n 107–115, 1967.
- [4]- Nath P, Izu M, "Performance of large area amorphous Si-based single and multiple junction solar cells", 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Las Vegas, NV, Oct 21–25, p 939.
- [5]- Yano M, Suzuki K, Nakatani K, Okaniwa H, "Roll-to-roll preparation of a hydrogenated amorphous silicon solar cell on a polymer substrate", Thin Solid Films 146:75–81, 1987.

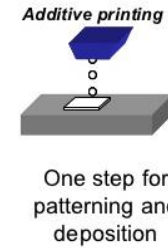


شكل (5): صناعة ثاني عضوي مشع باستخدام تقنية لفة إلى لفة

3.6 الطباعة بالإضافة (Additive Print):

وهي تقنية رخيصة للغاية، حيث لا يتجاوز طباعة المتر المربع الواحد أكثر من بضعة دولارات [25]. وهي متوافقة مع تقنية لفة إلى لفة، عالية الإنتاجية وأيضاً يمكنها طباعة الموصلات العضوية والمعدنية وحتى أشباه الموصلات والعوازل، وقد تم استخدام طباعة المواد العضوية في ترانزستور الفيلم الرقيق. أفنعة الحفر أو نزع التشكيلات وبعض المواد الغير عضوية يمكن أن تطبع باستخدام هذه التقنية أيضاً [26، 27].

طباعة الموصلات المعدنية من الجسيمات النانوية من الممكن أن يقلل من درجة حرارة التلبيد المطلوبة إلى قيم مقبولة لركائز البلاستيك. ولازالت طباعة عازل القاعدة بجودة عالية والاستقرار التشغيلي للمكونات المطبوعة بهذه التقنية تحتاج إلى حل. الشكل (6) يوضح تقنية الطباعة بالإضافة.



الشكل (6): تقنية الطباعة بالإضافة

7. نظرة مستقبلية:

مما تم استعراضه خلال الورقة من مكونات صناعة الإلكترونيات المرنة ومواد تصنيعها وتقنيات صناعتها المختلفة يمكن استنتاج أن هذه التقنية لازالت موضوع بحث وتطوير نشط بسبب وجود محددات لاستعمال بعض التقنيات والمواد في إنتاج مكونات ودوائر ذات جودة عالية. حيث أن استخدام الركائز المرنة والمواد الفيلمية المختلفة والحاجة إلى التغليف وغيرها فرض تحديات كثيرة أمام إمكانية الوصول إلى بعض التطبيقات الواعدة إضافة إلى تحدي تحسين أداء المكونات التي تم تصنيعها وتعاني من قصور في الأداء بسبب هذه التحديات.

فعلى سبيل المثال، استخدام المواد البوليميرية خلق قيوداً أمام استخدام بعض تقنيات التصنيع التي ليست متوافقة مع هذه المواد. كما أن استخدام البلاستيك كركيزة فرض حدوداً على درجة الحرارة التي تحتاجها بعض عمليات التصنيع التي يتطلب استخدامها معالجة بتقنيات تتطلب درجة

- [19]- Weiss J, Leppin C, Mader W, Salzberger U, "Aluminum metallization of polyester and polypropylene films: Properties and transmission electron microscopy microstructure investigations", *Thin Solid Film* 174:155, 1989.
- [20]- Chatham H, "Review oxygen diffusion barrier properties of transparent oxide coatings on polymeric substrates", *Surf Coatings Technol* 78:1-9, 1996.
- [21]- Cheng IC, Kattamis A, Long K, Sturm JC, Wagner S, "Stress control for overlay registration in a-Si:H TFTs on flexible organic-polymer-foil substrates", *J SocInfDisp* 13(7): 563-568, 2005.
- [22]- Ghosh AP, Gerenser LJ, Jarman CM, Fornalik JE, "Thin-film encapsulation of organic light-emitting devices", *ApplPhysLett* 86:223503, 2005.
- [23]- Yang J, Banerjee A, Guha S, "Amorphous silicon based photovoltaics- From earth to the "final frontier"", *Solar Energy Mater Solar Cells* 78:597-612, 2003.
- [24]- Takano A, Tabuchi K, Uno M, Tanda M, Wada T, Shimosawa M, Sakakibara Y, Kiyofuji S, Nishihara H, Enomoto H, Kamoshita T, "Production technologies of film solar cell", *Mater Res SocSympProc* 910:0910-A25-04, 2006.
- [25]- Wagner S, Gleskova H, Sturm JC, Suo Z, "Novel processing technology for macroelectronics. In: Street RA (ed) *Technology and Applications of Hydrogenated Amorphous Silicon*", Springer, Berlin, pp 222-251, 2000.
- [26]- Gleskova H, Wagner S, Shen DS, "Electrophotographic patterning of thin-film silicon on glass foil", *IEEE Electron Device Lett* 16:418-420, 1995.
- [27]- Wong WS, Ready SE, Matusiak R, White SD, Lu JP, Ho J, Street RA, "Amorphous silicon thin-film transistors and arrays fabricated by jet printing", *ApplPhysLett* 24:610, 2002.
- [6]- Brody TP, "The thin-film transistor – A late flowering boom", *IEEE Trans Electron Devices* ED-31:1614-1628, 1984.
- [7]- Brody TP, "The birth and early childhood of active matrix – A personal memoir", *J SocInfDisp* 4(3):113-127, 1996.
- [8]- Yang ND, Harkin G, Bunn RM, McCulloch DJ, Wilks RW, Knapp AG, "Novel fingerprint scanning arrays using polysilicon TFT's on glass and polymer substrates", *IEEE Electron Device Lett* 18:19-20, 1997.
- [9]- Smith PM, Carey PG, Sigmon TW, "Excimer laser crystallization and doping of silicon films on plastic substrates", *ApplPhysLett* 70:342-344, 1997.
- [10]- <http://www.universaldisplay.com/press/press-2006-2-7.htm>.
- [11]- Hsu PHI, Bhattacharya R, Gleskova H, Huang M, Suo Z, Wagner S, Sturm JC, "Thin film transistor circuits on large-area spherical surfaces", *ApplPhysLett* 81: 1723-1725, 2002.
- [12]- Bhattacharya R, Wagner S, Tung YJ, Esler J, Hack M. "Organic LED pixel array on a dome", *Proc IEEE* 93:1273-1280, 2005.
- [13]- Bhattacharya R, Wagner S, Tung YJ, Esler J, Hack M. "Plastic deformation of a continuous organic light emitting surface", *ApplPhysLett* 88:033507-1-3, 2006.
- [14]- William S. Wong and Alberto Salleo, eds., "Flexible Electronics: Materials and Applications", ISBN 978-0-387-74362-2, Springer Science+Business Media, 2009.
- [15]- MacDonald WA, "Engineered films for display technologies", *J Mater Chem* 14:4-10, 2004.
- [16]- Afentakis T, Hatalis M, Voutsas AT, Hartzell J, "Design and fabrication of highperformance polycrystalline silicon thin-film transistor circuits on flexible steel foils", *IEEE Trans Electron Devices* 53:815-822, 2006.
- [17]- Ma EY, Wagner S, "Amorphous silicon transistors on ultrathin steel foil substrates", *ApplPhysLett* 74:2661-2662, 1999.
- [18]- Prins W, Hermans J, "Theory of permeation through metal coated polymer films", *J PhysChem* 63:716-719, 1959.